نشریه پژوهش‌های زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۲۱۲-۱۹۷

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 197-212

مقاله علمی-پژوهشی

شبیه‌سازی اثرات تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود دیم (*Cicer arientinum* L.) توسط مدل CROPGRO-CHICKPEA

هانیه حاجی‌شعبانی[۱]، فرزاد مندنی[۲*]، علیرضا باقری[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۰۷

چکیده

به‌منظور شبیه‌سازی اثرات تاریخ کاشت بر رشد و عملکرد نخود دیم منطقه کرمانشاه توسط مدل CROPGRO-CHICKPEA، آزمایشی به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. تیمارها شامل سه تاریخ کاشت (۱۰ اسفند، ۲۰ اسفند و ۱۷ فروردین) به‌عنوان عامل اصلی و چهار رقم نخود (بیونیج، عادل، آرمان و ILC482) به‌عنوان عامل فرعی بود. ضرایب ژنتیکی ارقام توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی برای تاریخ کاشت ۱۰ اسفند محاسبه شد. نتایج واسنجی نشان داد مدل قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام نخود شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. نتایج ارزیابی‌های مدل نشان داد که میانگین nRMSE وزن خشک کل برای ارقام مورد بررسی ۱۶/۵ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. میانگین nRMSE عملکرد دانه نیز برای ارقام ذکر شده ۱۳/۵ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی تأخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد نخود شد. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به‌ترتیب، ۱۳۲۶/۶ و ۱۲۷۹/۶ کیلوگرم در هکتار در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند حاصل شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدل CROPGRO-CHICKPEA قادر است واکنش ارقام نخود در تاریخ کاشت‌های مختلف را تحت شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند که این نشان‌دهنده دقت بالای ضرایب ژنتیک محاسبه شده در بخش واسنجی مدل است.

واژه‌های کلیدی: ارقام نخود، عملکرد دانه، نمو فنولوژیک، واسنجی مدل

مقدمه

کاربرد مدل‌های کامپیوتری در تحقیقات کشاورزی با سرعت زیادی در حال گسترش است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهان زراعی، ابزارهای کمی هستند که براساس اصول علمی و روابط ریاضی استوار بوده و می‌توانند اثرات متفاوت اقلیم، خاک، آب و عوامل مدیریت زراعی را روی رشد و نمو گیاهان زراعی مورد ارزیابی قرار دهند. بر همین اساس در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد برای محاسبه واکنش محصولات زراعی نسبت به تغییر در عوامل محیطی و مدیریت زراعی، ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیک جهت بهبود عملکرد و کمک به تصمیم‌سازی‌ها جهت استفاده بهینه از منابع قابل دسترس افزایش چشمگیری داشته است (Amouzou *et al.*, 2018; Mondani *et al.*, 2015; Mahru *et al.*, 2010; Soltani *et al.*, 2006).

تحقیقات مزرعه‌ای در مورد یافتن راهکارهای به‌زراعی و به‌نژادی مناسب و با هدف افزایش عملکرد در واحد سطح، نیازمند صرف هزینه و زمان بسیاری می‌باشد. علاوه بر آن انجام آزمایشی با چندین گزینه به‌زراعی و به‌نژادی و بررسی اثرات متقابل آن‌ها در سطح مزرعه بسیار مشکل است (Delghandi *et al.*, 2014) بنابراین، از جمله راهکارهای مناسب و کم هزینه برای کمک به این نوع مطالعات، استفاده از روش‌های مدل‌سازی در تحقیقات کشاورزی است که در حال حاضر، مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و می‌توان از آن در پیش‌بینی فرآیندهای رشد و عملکرد محصولات زراعی استفاده کرد (Boote *et al.*, 2018; Jalilian *et al.*, 2017; Deihimfard *et al.*, 2015). بنابر آمار ارائه شده، بیش از صد مدل برای گیاهان زراعی ساخته شده که این توسعه زمینه‌ساز استفاده از سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را فراهم نموده است، در این سیستم‌ها داده‌های آماری توسط نرم‌افزارهای کامپیوتری وارد شده و سپس بر اساس اصول ریاضی مدل‌ها تهیه می‌شوند (Penning de Vries and van Laar, 1982) و در مرحله بعد با

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته اگرواکولوژی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۲- استادیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۳- استادیار علوم شناسایی و مبارزه با علف‌های هرز، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: f.mondani@razi.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v18i2.82684

استفاده از این مدل‌ها، رفتار سیستم به‌ویژه عملکرد گیاه (با تلفیق مدل‌های مختلف) شبیه‌سازی می‌شود.

در سال‌های اخیر، بسته نرم‌افزاری DSSAT[1] به‌طور موفقیت‌آمیزی برای شبیه‌سازی نتایج آزمایش‌های طولانی‌مدت استفاده شده است (Liu *et al.*, 2017). مدل‌های خانواده DSSAT یا سامانه پشتیبانی از تصـمیم برای انتقال فن‌آوری کشاورزی، توسط گروهی از دانشـمندان بـین‌المللـی تـدوین شـد، و اجرای مـدل‌هـای مختلـف شـبیه‌سـازی گیاهـان زراعی به صورت نظام‌منـد امکـان‌پـذیرکرد (Jones *et al.*, 1998). توسعهٔ مقدماتی این شیوه با تکیه بر این ایده ایجـاد شـد کـه بایـد معلومات موجود دربارهٔ خاک، آب و هوا، گیاهان زراعی و مدیریت را تلفیق کرد تا بتوان در انتقال فـن‌آوری تولیـد از مکانی به مکـان دیگـر بـا شـرایط خـاک و اقلـیم متفـاوت تصمیم‌های بهتری اتخاذ کرد (Taie *et al.*, 2018). بسته نرم‌افزاری DSSAT حاوی مدل‌های مختلف شبیه‌سازی برای انواع محصولات است که در این بین از مدل CROPGRO-Chickpea برای نخود استفاده می‌شود (Ovando *et al.*, 2018). در این مدل شبیه‌سازی رشد و نمو نخود از زمان کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌طور روزانه صورت گرفته و در نهایت عملکرد محصول پیش‌بینی می‌شود (Mohammed *et al.*, 2017). در زمینه ارزیابی توانایی این مدل در شـبیه‌سازی نقش مدیریت زراعی و عوامل اقلیمی بر تولید نخود مطالعـات اندکی در دنیا انجام شده است که از آن جمله می‌توان به شبیه‌سازی حساسیت عملکرد نخود به دماهای بالا در هند (Boote *et al.*, 2018) و پیش‌بینی بهترین شیوه مدیریت زراعی تحت شرایط تغییر اقلیم در شمال اتیوپی (Mohammed *et al.*, 2017) اشاره کرد. در بین عوامل مدیریتی تأثیرگذار بر میزان تولید نخود، تاریخ کاشت از طریق اثر بر رشد رویشی و زایشی و همچنین توازن بین آن‌ها و تغییر در کیفیت برداشت و در نهایت عملکرد، اهمیت بسیار بالای دارد. کاشت در تاریخ‌های مختلف، سبب برخورد مراحل رویشی و زایشی گیاه با درجه حرارت، تابش خورشید و طول روز متفاوت می‌شود. انتخاب تاریخ کاشت مناسب در مورد گیاه نخود که معمولاً در شرایط خشک و یا با تکیه بر رطوبت ذخیره شده در خاک کشت می‌شود و در اکثر مواقع نیز با درجـه حـرارت‌هـای بـالا در طـول فصل رشد مواجه است بسیار حائز اهمیت است (Benjamin and Nielsen, 2006).

اگرچه تاکنون در تحقیقات گذشته محققین مختلف تلاش‌های فراوانی برای معرفی تاریخ کاشت مطلوب در هر منطقه داشته‌اند، اما توجه به این نکته مهم که متاسفانه به دلیل فعالیت‌های صنعتی بشر، در بیشتر نقاط دنیا به‌ویژه کشور ایران با بحران تغییر اقلیم روبه‌رو هستیم که بیشتر نتایج تحقیقات گذشته در تصمیم‌گیری‌های عملیات زراعی را دچار دگرگون‌های شدیدی ساخته است، لذا مررو تحقیقات گذشته به‌منظور معرفی بهترین عملیات زراعی برای محصولات زراعی مختلف ضروری است. از این رو یکی از ابزارهای مناسب برای رسیدن به این اهداف استفاده از راهکارهای علم مدل‌سازی است که این امکان را برای ما فراهم می‌سازد که در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با حداقل هزینه‌ها نقش مدیریت زراعی به‌ویژه انتخاب تاریخ کاشت مناسب برای دستیابی به عملکرد مطلوب در شرایط دیم را برای ما فراهم می‌سازد. همچنین از دیگر قابلیت‌های استفاده از راهکارهای علم مدل‌سازی این است که درصورت موفقیت یک مدل در شبیه‌سازی یک یا چند مدیریت زراعی از آن مدل می‌توان برای پیش‌بینی سایر عملیات زراعی نیز استفاده کرد (Jones *et al.*, 2003; Keating *et al.*, 2003; Jame *et al.*, 1996). از آنجاکه مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصولات زراعی، قبـل از کـاربرد گسترده در یک منطقـه باید مورد ارزیابی (واسنجی[2] و تعیین اعتبار[3]) گردنـد و با توجه به اینکه مدل CROPGRO-Chickpea تاکنون برای هیچ‌یک از مناطق ایران مورد ارزیابی قرار نگرفته است، لذا هـدف ایـن تحقیـق، ارزیابی توانایی مدل مذکور در شبیه‌سازی اثر تاریخ کاشت بر عملکرد ارقام نخود در شرایط آب و هوایی کرمانشاه به‌منظور کاربرد گسترده مدل برای سایر عملیات زراعی بود.

مواد و روش‌ها

تشریح مدل

به‌منظور شبیه‌سازی اثر تاریخ کاشت بر رشد و تولید نخود از مدل CROPGRO-Chickpea از بسته نرم‌افزاری DSSAT - v 4/6 استفاده شد (Hoogenboom *et al.*, 2015). در این مدل شبیه‌سازی رشد و نمو نخود (*Cicer arientinum* L.) از زمان کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌طور روزانه صورت گرفت و در نهایت عملکرد محصول پیش‌بینی شد. ورودی‌های مدل شامل مدیریت مزرعه، اطلاعات خاک‌شناسی و هواشناسی منطقه مورد مطالعه بود. قسمت مدیریت مزرعه شامل مشخصات کرت‌های آزمایش نظیر فواصل کاشت، عمق کاشت، تراکم بذر، معرفی تیمارهای آزمایش، معرفی ارقام، شیوه مصرف کود و مقدار آن، تاریخ کاشت و برداشت، بافت و ساختمان خاک بود که در بخش XBuild بسته نرم‌افزاری DSSAT معرفی گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز نیز شامل تشعشع خورشیدی (بر حسب مگاژول در متر مربع که از داده‌های ساعت آفتابی توسط روش گودریان و وان‌لار (Goudriaan and Van Laar, 1993) محاسبه شد)، دمای حداقل و حداکثر (بر حسب

1- The Decision Support System for Agrotechnology Transfer

2- Calibration

3- Validation

درجه سانتی‌گراد) و بارندگی (بر حسب میلی‌متر) که به‌صورت روزانه از سازمان هواشناسی برای شرایط آب و هوایی کرمانشاه گرفته شد و توسط بخش Weatherman بسته نرم‌افزاری DSSAT در قالب فایل هواشناسی به‌عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید. فایـل A حـاوی اطلاعـاتی نظیر عملکرد دانه (بر حسب کیلوگرم در هکتار)، وزن خشک کل (بـر حسب کیلوگرم در هکتار)، حداکثر شاخص سـطح بـرگ، تعـداد روز از کاشت تا گلدهی و تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و در نهایـت فایـل T در برگیرنده ویژگی‌های روند تغییرات مراحـل نمـو فنولوژیـک، رونـد تغییرات عملکرد دانه، روند تغییرات وزن خشک کل و رونـد تغییـرات شاخص سطح برگ نخود بود که در طول فصل رشد اندازه‌گیری شده بود. علاوه بر این اطلاعات خاکشناسی مورد نیاز شامل درصد رس، شن و سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، کل نیتروژن قابل جذب توسط گیاه، درصد کربن آلی، نقطه ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و میزان رطوبت اشباع خاک محل آزمایش بود (جدول ۱) که توسط بخش SBuild بسته نرم‌افزاری DSSAT در قالب فایل خاکشناسی به‌عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 1- Soil physical and chemical properties of experimental field

عمق Depth (cm)	بافت Texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	کربن آلی Organic Carbon (%)	نیتروژن Nitrogen (%)	اسیدیته pH	وزن مخصوص ظاهری Balk density ($g.cm^{-3}$)	نقطه پژمردگی دائم Permanent wilting point ($m^3.m^{-3}$)	نقطه ظرفیت زراعی Field capacity ($m^3.m^{-3}$)	رطوبت اشباع Saturation ($m^3.m^{-3}$)
0-30	Clay-Silt	44.3	39.0	16.7	1.5	0.17	7.4	1.4	0.205	0.325	0.49
30-60	Clay-Silt	44.7	38.7	16.7	1.1	0.17	7.4	1.5	0.205	0.325	0.49

یکی از مهم‌ترین بخش‌های فایل مدیریت زراعی معرفی رقم یا ارقام مورد مطالعه است که از طریق تغییر پارامترهای گیاهی که در بسته نرم‌افزاری DSSAT به ضرایب ژنتیکی معروف هستند، صورت می‌گیرد. ضرایب ژنتیکی، رشد و نمو گیاه را در شرایط آب و هوایی متفاوت تحت تأثیر خود قرار می‌دهند (Liu *et al.*, 2011). از آنجـا کـه ارقـام مختلف گیاهان زراعی از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی با یکدیگر تفاوت دارند، این اختلافات روی رشد، نمو و عملکـرد آن‌هـا تاثیرگذار خواهد بود. بنابراین این اختلافات واریته‌ای باید به نـوعی در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی در نظر گرفته شوند تا پیش‌بینـی قابل قبولی انجام شود. نخود دارای ۱۵ ضریب ژنتیکی (جدول ۳) است، که لازم است جهت واسـنجی مـدل از اطلاعـات مسـتخرج از آزمایش‌های مزرعه و یا منابع معتبـر اسـتخراج شـوند. پـس از انجـام فرآیند واسنجی و کسب اطمینان از دقت ضرایب ژنتیکـی، لازم اسـت که مدل مورد ارزیـابی توسـط اطلاعـات مسـتخرج از آزمـایش‌هـای مستقل (آزمایش‌هایی که به‌منظور استخراج ضرایب ژنتیکی اسـتفاده نشده‌اند) قرار گیرد. در این بررسی استخراج ضرایب ژنتیکی به‌منظور واسنجی مـدل و همچنـین فراینـد ارزیـابی از طریـق آزمـایش مزرعه‌ای زیر صورت گرفت.

آزمایش مزرعه

به‌منظور تهیه داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای واسنجی و ارزیابی مدل CROPGRO-Chickpea، پژوهشی در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۰۶ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۳۱۷ متر از سطح دریا) انجام شد. متوسط بارندگی سالیانه ۴۵۵ میلی‌متر و حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه منطقه به‌ترتیب، ۲۲/۶ و ۵/۹ درجه سانتی‌گراد است. اطلاعات هواشناسی منطقه مورد بررسی به‌صورت متوسط ماهیانه طی دوره رشد نخود در جدول ۲ نشان داده شده است.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده و بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار در سیستم کشت دیم اجرا شد. تیمارهای آزمایش شامل ۳ تاریخ کاشت (۱۰ اسفند، ۲۰ اسفند و ۱۷ فروردین که بر اساس وقوع بارندگی موثر در نظر گرفته شد) به‌عنوان عامل اصلی و ۴ رقم (بیونیج، عادل، آرمان و ILC480) به‌عنوان عامل فرعی بود. عملیات آماده‌سازی زمین در اسفند ماه سال ۱۳۹۵ انجام گرفت. بر اساس نتایج آزمون خاک به‌ترتیب میزان ۵۰ و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، کود اوره و سوپر فسفات تریپل هم‌زمان با کاشت به خاک محل آزمایش اضافه شد. در هر کرت اصلی که به ابعاد ۱۱× ۴ متر مربع بود، برای هر رقم ۸ ردیف کاشت با فاصله ۳۰ سانتی‌متری توسط فوکا ایجاد شد. به‌منظور کشت ارقام ذکر شده، بذور پس از ضدعفونی با قارچ‌کش Tebaconazole DS٪۲، به روش دستی روی ردیف‌هایی با فاصله ۸ سانتی‌متر و در عمق ۵ تا ۸ سانتی‌متر و با تراکم یکنواخت ۴۰ بوته در متر مربع کشت شد. در طی فصل رشد کنترل‌های مربوط به بیماری‌ها و مبارزه با علف‌های‌هرز در صورت لزوم با روش‌های مرسوم صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت

مراحل نمو فنولوژیک نخود برحسب روز پس از کشت و نمونه‌برداری‌های تخریبی از بوته‌های نخود بود. برای نمونه‌برداری تخریبی از ۸ هفته پس از کاشت تا مرحله رسیدگی کامل، هر ۷ روز یکبار ۵ بوته از هر کرت با در نظر گرفتن اثرات حاشیه به‌صورت کاملاً تصادفی برداشت و برای اندازه‌گیری سطح برگ و وزن خشک به آزمایشگاه منتقل شد. برای اندازه‌گیری شاخص سطح برگ از تکنیک پردازش تصویر با بهره‌گیری از نرم‌افزار JMicro version 1.2.7 استفاده شد. به این صورت که مساحت برگ‌های هر بوته با تصویربرداری از آن‌ها محاسبه و با تعمیم این مقدار در واحد متر مربع، شاخص سطح برگ محاسبه شد. جهت اندازه‌گیری وزن خشک نیز نمونه‌ها در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار گرفتند. در زمان رسیدگی فیزیولوژیک، جهت برداشت نهایی یک متر مربع از هر کرت با رعایت اصول حاشیه به‌صورت کف‌بر برداشت شد. پس از خشک شدن نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در مدت زمان کافی، عملکرد دانه و عملکرد ماده خشک کل اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی کرمانشاه طی دوره رشد نخود در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵

Table 2- The weather data for Kermanshah region during growth period of chickpea during 2016-2017

ماه Month	دمای حداکثر Maximum temperature (°C)	دمای حداقل Minimum temperature (°C)	بارندگی Precipitation (mm)	تشعشع تجمعی خورشید Cumulative solar radiation (MJ m^{-2})
اسفند March	15.0	3.1	132.6	355.9
فروردین April	21.9	8.3	64.4	413.1
اردیبهشت May	28.2	9.6	20.1	524.6
خرداد June	34.9	13.5	0.0	640.4
تیر July	39.1	18.2	0.0	594.6

واسنجی مدل

به‌منظور واسنجی مدل لازم است که ضرایب ژنتیکی ارقام مورد ارزیابی در محل آزمایش تحت شرایط مطلوب رشد (عدم وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) تعیین شوند (Mohammed *et al.*, 2017). برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری DSSAT استفاده شد (Mondani, 2017). برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل براساس شرایط آب و هوایی، خاکشناسی و همچنین مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای هر رقم تخمین می‌زند. در این مرحله ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آن‌ها تعیین و به‌طور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. اطلاعات لازم برای محاسبه ضرایب ژنتیکی شامل طول دوره نموی از سبز شدن تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک، روند تغییرات شاخص سطح برگ، حداکثر شاخص سطح برگ، روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل و روند تغییرات عملکرد دانه نخود بود که از شرایط تیماری تاریخ کاشت ۱۰ اسفند (شرایط مطلوب) که به‌منظور واسنجی مدل طرح‌ریزی شده بود، استخراج گردید.

ارزیابی مدل

به‌منظور ارزیابی مدل از نتایج دیگر تیمارهای آزمایش (تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و ۱۷ فروردین) که به‌منظور استخراج پارامترها در فرآیند واسنجی استفاده نشده بود و همچنین نتایج آزمایش مندنی و جلیلیان (Mondani and Jalilian, 2019) استفاده گردید. در ارزیابی مدل از صفاتی نظیر مراحل نمو فنولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه استفاده شد. به‌منظور ارزیابی مدل و دقت در پیش‌بینی از شاخص‌های آماری مختلفی استفاده می‌شود (Mondani, 2017; Mohammed *et al.*, 2017). شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این بررسی شامل برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود که از طریق روابط (۱ تا ۳) محاسبه شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۱)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (۲)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (۳)$$

در این معادلات Si، مقادیر شبیه‌سازی شده، Oi، مقادیر مشاهده شده، n، تعداد مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و Ō، میانگین

مقادیر مشاهده شده است. ضریب تبیین یا R^2، نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. جذر میانگین مربعات خطا نشان‌دهنده میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (Willmott, 1982). جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز درصد نسبی میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقادیر صفر تا ۱۰،۱۰تا ۲۰،۲۰ تا ۳۰ درصد به‌ترتیب بیانگر دقت عالی، خوب و متوسط شبیه‌سازی‌ها است و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد نیز نشان‌دهنده عدم دقت شبیه‌سازی‌های مدل است (Yang *et al.*, 2013). مقادیر شاخص آماری توافق ویلموت بین صفر تا یک است که مقادیر۰/۹ ≥d، بیانگر توافق عالی، ۰/۹≥d> ۰/۸، بیانگر توافق خوب، ۰/۸ ≥d> ۰/۷، بیانگر توافق متوسط و ۰/۷ ≥d، بیانگر توافق ضعیف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (Liu *et al.*, 2013).

نتایج و بحث

ضرایب ژنتیکی

ضرایب ژنتیکی تخمین‌زده شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری DSSAT در جدول ۳ نشان داده شده است. مدل CROPGRO-Chickpea دارای ۱۵ ضریب ژنتیکی است که رشد و نمو نخود را تشریح می‌کند. سینگ و ویرمنی (Singh and Virmani, 1996) نیز دامنه ضرایب ژنتیکی ارقام مختلف نخود را برای ضرایب EM-FL، FL-SH، FL-SD، SD-PM، SLAVR، SDPDV، PODUR، LFMAX، SIZLF، XFRT و THRSH به‌ترتیب، ۲۹ تا ۴۱، ۸، ۲۰، ۴۱ تا ۴۹ روز فتوترمال، ۱/۲ تا ۱/۶ دانه، ۹۰ تا ۹۵ روز فتوترمال، ۱/۷ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن بر متر مربع در ثانیه، ۱۰ سانتی‌متر مربع و ۷۳ تا ۸۵ درصد گزارش کردند. همچنین سورچا و همکاران (Sorecha *et al.*, 2017) همین ضرایب را به‌ترتیب، ۳۹ تا ۴۰، ۹ تا ۱۰، ۱۴ تا ۱۵، ۳۰ تا ۳۵ روز فتوترمال، ۱ تا ۱/۲ دانه، ۱۸ روز فتوترمال، ۱ میلی‌گرم دی‌اکسیدکربن بر متر مربع در ثانیه، ۱۰ سانتی‌متر مربع و ۸۵ درصد گزرارش کردند.

جدول ۳- ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام نخود مورد بررسی

Table 3- The genetic coefficients calculated for the evaluated chickpea cultivars

ضرایب ژنتیکی Genetic coefficients	بیونیج Bivanij	عادل Adel	آرمان Arman	ال‌سی۴۸۲ ILC482
زمان بین سبز شدن تا ظهور اولین گل EM-FL (Photothermal days)	29	35	35	26.5
زمان بین ظهور اولین گل تا اولین غلاف FL-SH (Photothermal days)	5.5	5	5	5
زمان بین ظهور اولین گل تا اولین دانه FL-SD (Photothermal days)	9.5	9	10	9
زمان بین ظهور دانه اول تا بلوغ فیزیولوژی SD-PM (Photothermal days)	30	29	28	27
زمان بین ظهور گل اول و پایان توسعه برگ FL-LF (Photothermal days)	38	37	36	35
حداکثر سرعت فتوسنتز برگ LFMAX (mg CO^2 m^{-2} s^{-1})	1	1	1	1
سطح ویژه برگ تحت شرایط استاندارد SLAVR (cm^2 g^{-1})	200	155	200	200
حداکثر اندازه برگ کامل SIZLF (cm^2)	10	10	10	10
حداکثر کسری از رشد روزانه تقسیم بر دانه + پوست XFRT	0.96	0.96	0.96	0.96
بیشترین وزن دانه WTPSD (g)	0.255	0.32	0.23	0.26
دوره پر شدن دانه SFDUR (Photothermal days)	29	29	29	29
میانگین دانه در غلاف در شرایط روبه رشد استاندارد SDPDV (#/pod)	1.3	1.2	1.3	1
زمان مورد نیاز برای رسیدن رقم به غلاف نهایی PODUR (Photothermal days)	18	18	18	16
حداکثر نسبت دانه / دانه + پوست در بلوغ THRSH (%)	85	85	85	85
میزان پروتئین در دانه SDPRO ($g_{protein}$ $g^{-1}{}_{seed}$)	0.216	0.216	0.216	0.216

جدول ٤- نتایج واسنجی مدل برای مراحل نمو فیزیولوژیک، شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه ارقام نخود در تاریخ کاشت ۱۰ اسفند

Table 4- Model calibration results for development stages, leaf area index, total dry weight and grain yield of chickpea cultivars at 28 February sowing date

ارقام Cultivars	روز تا گلدهی Anthesis day		روز تا رسیدگی فیزیولوژیک Maturity day		شاخص سطح برگ Leaf area index		وزن خشک کل Total dry weight (kg.ha^{-1})		عملکرد دانه Grain yield (kg.ha^{-1})	
	شبیه‌سازی شده Simulated	اندازه‌گیری شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	اندازه‌گیری شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	اندازه‌گیری شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	اندازه‌گیری شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	اندازه‌گیری شده Measured
بیونیج Bivanij	65	63	108	105	1.985	2.269	2775	2865	1182	1173
عادل Adel	65	71	112	112	1.863	2.048	2789	2943	947	890
آرمان Arman	65	71	114	114	2.326	2.526	2462	2731	898	767
ال‌سی۴۸۲ ILC482	65	60	100	100	1.906	1.985	2547	2833	1249	1367

واسنجی مدل

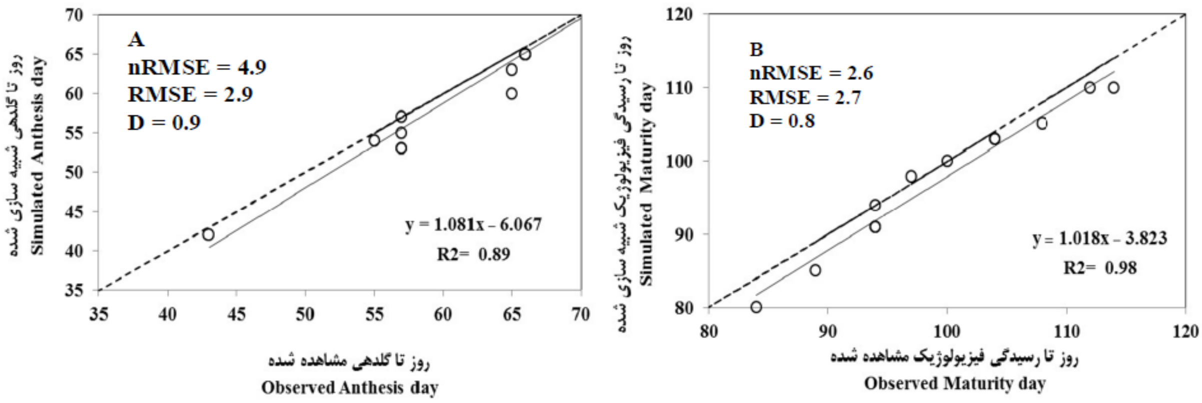
نتایج این بررسی نشان داد که اختلاف بین داده‌های شبیه سازی شده و اندازه‌گیری روز از کاشت تا گلدهی ۲ تا ۶ روز بود (جدول ۴). تعداد روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای ارقام عادل، آرمان و ILC482 یکسان بود ولی برای رقم بیونیج به‌ترتیب، ۱۰۵ و ۱۰۸ روز بود که نشان‌دهنده ۳ روز اختلاف است. مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای ارقام بیونیج و ILC482، ۰/۷۶ روز و برای ارقام عادل و آرمان نیز، ۰/۸۵ روز بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مراحل نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای ارقام عادل و آرمان حدود ۱۵/۸ درصد میانگین مشاهدات و برای ارقام بیونیج و ILC482 به‌ترتیب، ۱۶/۵ و ۱۴/۷ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین شاخص سطح برگ شبیه‌سازی شده ارقام نخود از ۱/۹ تا ۲/۳ متغیر بود که نشان‌دهنده اختلاف بسیار ناچیزی نسبت به میانگین‌های اندازه‌گیری شده بود (جدول ۴). مقدار جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ برای رقم آرمان ۰/۶۴، رقم ILC482 ۰/۳۴ و برای ارقام بیونیج و عادل معادل حدود ۰/۴۷ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز برای ارقام بیونیج، عادل، آرمان و ILC482 به‌ترتیب، ۲۳/۷، ۲۵، ۲۷/۴ و ۱۷/۸ درصد میانگین مشاهدات شاخص سطح برگ بود. میانگین وزن خشک کل شبیه‌سازی شده اختلاف ناچیزی (از ۹۰ تا ۲۸۶ کیلوگرم در هکتار) نسبت به میانگین‌های مشاهده شده داشت (جدول ۴).

میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای رقم بیونیج، عادل، آرمان و ILC482 به‌ترتیب، ۲۷۲/۹، ۳۳۱/۹، ۴۳۶/۹ و ۳۴۲/۹ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز به‌ترتیب، ۹/۸، ۱۱/۹، ۱۷/۷ و ۱۳/۵ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده برای ارقام نخود از ۷۶۷ تا ۱۳۶۸ کیلوگرم در هکتار متغیر بود، در حالی‌که اطلاعات مستخرج از مزرعه این صفت را از ۸۹۸ تا ۱۲۴۹ کیلوگرم در هکتار نشان داد (جدول ۴). اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد بین ۹ تا ۱۳۱ کیلوگرم در هکتار متغیر بود. میزان جذر میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ارقام بیونیج، عادل، آرمان و ILC482 به‌ترتیب، ۱۳۰/۰، ۶۶/۴، ۱۵۳/۳ و ۱۲۷/۱ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز به‌ترتیب، ۱۱/۰، ۷/۰، ۱۷/۰ و ۱۰/۱ درصد میانگین مشاهدات بود. نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی محاسبه شده نشان داد که مدل CROPGRO-Chickpea قادر است با اختلاف ناچیزی ویژگی‌های رشد و نمو را برای ارقام نخود شبیه‌سازی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. سورچا و همکاران (Sorecha *et al.*, 2017) نیز میزان جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک و عملکرد دانه ارقام مختلف نخود را به‌ترتیب حدود ۰/۱ تا ۰/۵ روز، ۰/۳ روز و ۲۷ تا ۲۹/۵ کیلوگرم در هکتار گزارش کردند. مقایسه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات نشان‌دهنده دقت بسیار بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی بسته نرم‌افزاری DSSAT است (Patil and Patel, 2017; Sorecha *et al.*, 2017).

ارزیابی مدل

نمو فنولوژیک

طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسـیدگی فیزیولوژیـک هم در شـرایط مزرعـه و هم در شرایط شـبیه‌سازی صرف‌نظر از ارقام مورد بررسی، تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار گرفت. کشت دیر هنگام نخود منجر به کاهش طول دوره نمو فنولوژیک گیاه شد. به نظر می‌رسد در شرایط کشت دیر هنگام، برخورد مراحل نموی گیاه با دماهای بالاتر منجر به افزایش سرعت نمو و در نهایت کاهش طول دوره نموی گردید. در شرایط مزرعه کمترین و بیشترین طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی مربوط به رقم ILC482 در تاریخ کاشت ۱۷ فروردین و ارقام عادل و آرمان در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند به‌ترتیب معادل ۵۰ و ۶۲ روز بود. در شرایط شبیه‌سازی نیز کمترین و بیشترین طول دوره نموی روز از کاشت تا گلدهی مربوط به رقم ILC482 در تاریخ کاشت ۱۷ فروردین و ارقام عادل و آرمان در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند به‌ترتیب معادل ۴۲ و ۶۵ روز بود. در شرایط مزرعه کمترین طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ کاشت ۱۷ فروردین و رقم ILC482 به میزان ۸۴ روز و بیشترین آن مربوط به تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و ارقام عادل و آرمان به میزان ۱۰۴ روز بود. در شرایط شبیه‌سازی کمترین طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک مربوط به تاریخ کاشت ۱۷ فروردین و رقم ILC482 به میزان ۸۰ روز و بیشترین آن مربوط به تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و ارقام عادل و آرمان به میزان ۱۰۳ روز بود. صرف‌نظر از تاریخ کاشت و ارقام مورد بررسی میزان جذر میانگین مربعات خطا برای مرحله نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌ترتیب، ۲/۹ و ۲/۷ روز و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز به‌ترتیب، ۴/۹ تا ۲/۶ درصد مراحل نموی مشاهده شده بود (شکل ۱). ضریب توافق ویلموت (d) برای مرحله نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌ترتیب، ۰/۸ تا ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک ارقام نخود مورد بررسی در تاریخ کاشت‌های ۲۰ اسفند و ۱۷ فروردین داشت (شکل ۱).



شکل ۱- آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مراحل نموی روز از کاشت تا گلدهی (A) و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک (B) در تاریخ‌های کاشت برای ارزیابی مدل

Figure 1- Regression analysis between simulated and measured development stages of Anthesis day (A) and Maturity day (B) in sowing date treatments for model validation

همان‌گونه که از شکل ۱ پیداست مدل CROPGRO-Chickpea مراحل نموی ارقام نخود را کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده پیش‌بینی نمود، به‌طوری‌که صرف‌نظر از تاریخ کاشت و ارقام مورد بررسی اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مشاهده شده برای مراحل نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به‌ترتیب، ۱ و ۲ روز به‌دست آمد. با این وجود نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست به‌ترتیب تا بیش از ۸۹ و ۹۸ درصد تغییرات مشاهده شده مراحل نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک را پیش‌بینی کند که حاکی از دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی این صفت است (شکل ۱).

یکی از دلایل دقت بسیار بالای مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک در این مطالعه را می‌توان برآورد دقیق ضرایب ژنتیکی ارقام نخود ذکر نمود. همچنین دقت در ثبت مراحل مختلف فنولوژیکی برای برآورد پارامترها و نیز ارزیابی مدل می‌تواند دلیل دیگر باشد. در مدل‌های رشد گیاهان زراعی دقت شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک گیاه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است زیرا تمام فرآیندهای تولید مواد فتوسنتزی و تخصیص آن‌ها بین

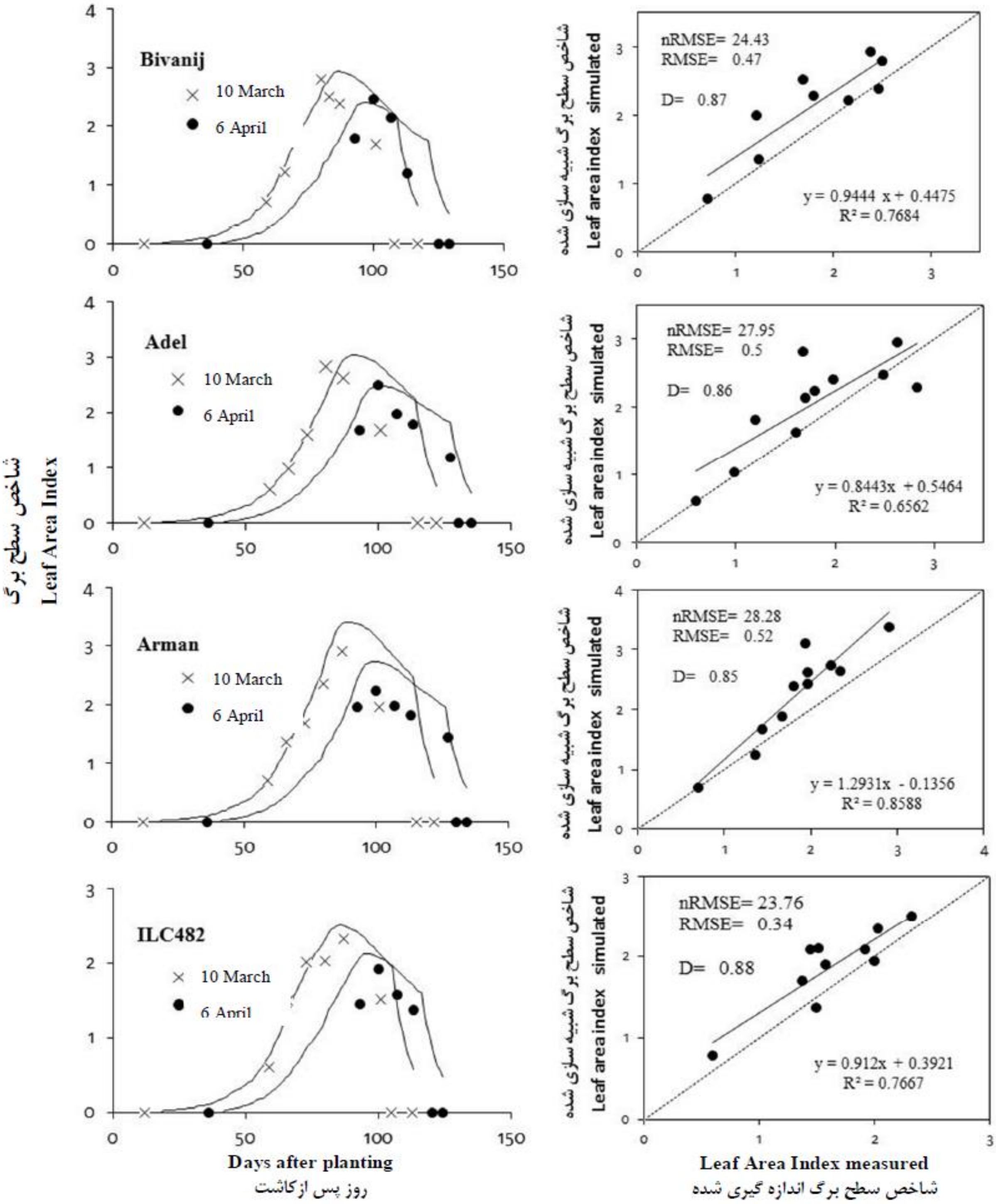
اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین سایر فرآیندهای رشدی گیاه تابعی از مراحل نموی است. پتیل و پتل (Patil and Patel, 2017) مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل نموی روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک شبیه‌سازی شده ارقام نخود توسط مدل CROPGRO-Chickpea در هندوستان را به‌ترتیب، ۳/۵ و ۴/۵ روز گزارش کردند. سورچا و همکاران (Sorecha *et al.*, 2017) نیز نشان دادند مدل CROPGRO-Chickpea دقت خوبی برای شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک دارد. وجود برهمکنش‌های مختلف در شرایط مزرعه، تفاوت زیاد بین گونه‌ها و ارقام و نبود اطلاعات کمّی کافی سبب شده مدلسازی نمو فنولوژیک در مقایسه با سایر فرآیندها نسبتاً مشکل‌تر باشد (Mahru *et al.*, 2010). همچنین با توجه به نقش مهمی که مراحل فنولوژی در مدیریت مزرعه برای دستیابی به حداکثر تولید دارند به نظر می‌رسد مدل DSSAT می‌تواند با پیش‌بینی مراحل فنولوژی در اقلیم‌های متفاوت به‌عنوان یک ابزار مفید برای مدیریت مزرعه مورد استفاده قرار گیرد.

شاخص سطح برگ

نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از روند تغییرات نسبتاً یکسان شاخص سطح برگ نخود در طول فصل رشد برای تمامی تیمارها بود (شکل ۲). در تمام تیمارهای مورد بررسی بعد از سبز شدن، شاخص سطح برگ در ابتدا با سرعت کم و سپس با گرم‌تر شدن هوا از ۱۵ فروردین ماه به بعد به‌صورت خطی و با شیب تند افزایش یافت. با این حال، در تاریخ کاشت ۱۷ فروردین به دلیل مواجهۀ سریع‌تر گیاه با روزهای گرم و آفتابی دورۀ رشد نمایی شاخص سطح برگ کوتاه‌تر بوده و گیاه سریع‌تر وارد مرحله رشد خطی افزایش شاخص سطح برگ شد. شاخص سطح برگ بعد از مرحله گلدهی به علت پیری و ریزش برگ‌ها به‌تدریج کاهش یافت و در نهایت در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و ۱۷ فروردین برای ارقام بیونیج، عادل، آرمان و ILC482 به‌ترتیب در ۱۰۶ و ۹۳، ۱۱۱ و ۹۹، ۱۱۱ و ۹۸، ۱۰۲ و ۸۸ روز پس از کاشت به انتهای خود رسید که با نتایج مشاهده شده در مزرعه همخوانی بالای داشت (شکل ۲). هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها، روز تا رسیدن به حداکثر شاخص سطح برگ ارقام نخود تحت تأثیر تاریخ کاشت قرار گرفت، به گونه‌ای که با تأخیر در کاشت، شاخص سطح برگ ارقام نخود کاهش یافت. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند نسبت به تاریخ کاشت ۱۷ فروردین شاخص سطح برگ برای ارقام بیونیج، عادل، آرمان و ILC482 به‌ترتیب حدود ۶/۵، ۵/۴، ۸/۲۳ و ۴/۸ درصد کاهش یافت. به نظر می‌رسد در شرایط کشت دیرهنگام به علت کوتاه شدن دوره رشد رویشی نخود، کوتاهی عمر برگ‌ها و خشک شدن زودتر آن‌ها به دلیل مواجهه شدن با دمای بالا، شاخص سطح برگ در مقایسه با کشت زود هنگام کاهش شدیدی از خود نشان داد (شکل ۲).

میزان جذر میانگین مربعات خطا و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده شاخص سطح برگ ارقام مورد مطالعه به‌ترتیب بین ۰/۳ تا ۰/۵ و ۲۰/۸ تا ۲۸/۲ درصد مشاهدات به‌دست آمد (شکل ۲). ضریب توافق ویلموت (d) برای شاخص سطح برگ ارقام مورد مطالعه ۰/۸ بود که حاکی از دقت خوب مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی سطح برگ ارقام نخود داشت (شکل ۲). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۸۶ درصد تغییرات مشاهده شده شاخص سطح برگ را پیش‌بینی کند که حاکی از دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی این صفت است (شکل ۲). نتایج ارزیابی مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی سطح برگ ارقام نخود تحت شرایط تاریخ‌های مختلف کشت نشان داد که مدل در تیمارهای مورد بررسی میزان شاخص سطح برگ را در مراحل نموی بعد از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک بالاتر از مقادیر مشاهده شده تخمین زد که این موضوع باعث افزایش مقادیر جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده به‌ویژه در ارقام بیونیج، عادل و آرمان و در نتیجه کاهش نسبی دقت پیش‌بینی‌ها گردید. قابلیت پیش‌بینی تغییرات سطح برگ در مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی دارای اهمیت است. پیش‌بینی شاخص سطح برگ برای تخمین میزان تشعشع دریافت شده و تولید ماده خشک مورد نیاز است. همچنین پیش‌بینی آن در تعیین نسبت تبخیر به تبخیر تعرق دارای اهمیت است (Soltani *et al.*, 2006). در مجموع از مقایسه شبیه‌سازی‌های انجام گرفته توسط مدل DSSAT در این مطالعه با نتایج مطالعات دیگر مشخص است که نتایج حاصل از این مطالعه برای شبیه‌سازی شاخص سطح برگ در مقایسه با دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه قابل قبول است اما تفاوت‌های بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نیاز به بررسی دقیق‌تر در مطالعات بعدی دارد. لگرسومی و همکاران (Lagarswamy *et al.*, 2000) نیز بیان کردند اگرچه مدل CROPGRO-Soybean میزان شاخص سطح برگ را در طول رشد نمایی شاخص سطح برگ بیشتر از مقدار مشاهده شده پیش‌بینی کرد اما از دقت نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ سویا بهرمند بود. بتیا و همکاران (Bhatia *et al.*, 2008) میزان جذر میانگین مربعات خطا و ضریب توافق ویلموت (d) در شبیه‌سازی سطح برگ ارقام مختلف سویا تحت شرایط محدویت آب و بدون محدودیت را به ترتیب بین ۰/۲۹ تا ۰/۶۹ و ۰/۸۹ تا ۰/۹۹ نشان دادند. در مطالعه‌ای دیگر که توسط منگ و همکاران (Meng *et al.*, 2019) در شمال چین اجرا شده بود میزان جذر میانگین مربعات خطا

و ضریب توافق ویلموت (d) برای تغییرات شاخص سطح برگ پنبه تحت روش‌های مختلف آبیاری توسط مدل CROPGRO-Cotton به‌ترتیب ۰/۹۶۵ و ۰/۹۱ گزارش شد.



شکل ۲- گراف سمت چپ: اثر تاریخ کاشت بر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) نخود. گراف سمت راست: آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شاخص سطح برگ در تاریخ‌های کاشت برای ارزیابی مدل

Figure 2- Left figure: Effect of sowing date on measured (points) and simulated (lines) of chickpea leaf area index. Right figure: Regression analysis between simulated and measured leaf area index in sowing date treatments for model validation

عملکرد وزن خشک کل

روند افزایش ماده خشک کل مشاهده شده ارقام نخود در کلیه تیمارهای آزمایش به‌صورت سیگموئیدی بود، به گونه‌ای که در اوایل دوره رشد، تجمع ماده خشک کل به علت جذب نور و در نتیجه فتوسنتز و تولید ماده خشک کمتر، پایین بود اما به‌تدریج و پس از عبور از مرحله رشد نمایی با وارد شدن به مرحله رشد خطی به دلیل افزایش شاخص سطح برگ، میزان فتوسنتز کانوپی افزایش یافته و شیب منحنی تجمع ماده خشک کل شدت بیشتری به خود گرفت و بعد از آن در انتهای دوره رشد گیاه به علت پیری و ریزش برگ‌ها و همچنین سایه‌اندازی برگ‌های بالایی بر برگ‌های پایینی کانوپی و افزایش سرعت تنفس آن‌ها وارد مرحله رشد ثابت گردید که همخوانی بالایی با روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل شبیه‌سازی شده داشت (شکل ۳). در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵، صرف‌نظر از تاریخ کاشت بیشترین وزن خشک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به‌ترتیب مربوط به رقم عادل (۳۵۱۱/۷ کیلوگرم در هکتار) و رقم بیونیج (۴۴۲۸/۷ کیلوگرم در هکتار) بود (شکل ۳).

میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای ارقام مورد ارزیابی از ۲۹۲/۲ تا ۶۷۴/۲ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطـای نرمـال شـده نیز از ۱۱/۷ تا ۲۵/۵ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (شکل ۳ و جدول ۵). ضریب توافق ویلموت (d) برای وزن خشک کل ۰/۹ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی وزن خشک کل در تیمارهای مختلف داشت (شکل ۳). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۸ درصد تغییرات مشاهده شده وزن خشک کل را پیش‌بینی کند که حاکی از دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی این صفت است (شکل ۳).

اگرچه همانطور که در شکل ۳ مشخص است مقدار ماده خشک شبیه‌سازی شده از مقدار ماده خشک مشاهده شده اندکی بیشتر است، زیرا یکی از دلایل این امر، عدم وجود شرایط کاملاً مطلوب رشد در مزرعه می‌باشد در حالی‌که در مدل فرض می‌شود که عوامل محدودیت وجود ندارد. همچنین احتمال دارد این کاهش ماده خشک مشاهده شده ناشی از ماده خشک ریخته شده بر روی زمین در شرایط مزرعه باشد. در مطالعه‌ای دیگر آموزو و همکاران (Amouzou *et al.*, 2018) نشان دادند که میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده و ضریب توافق ویلموت (d) در شبیه‌سازی ماده خشک کل پنبه تحت شرایط آبیاری و کاربرد کود نیتروژن در عمق‌های مختلف خاک توسط مدل CROPGRO-Cotton به‌ترتیب بین ۳۱ تا ۴۶ درصد میانگین مشاهده‌ها و ۹۱ تا ۹۷ درصد گزارش شد. بتیا و همکاران (Bhatia *et al.*, 2008) نیز میزان جذر میانگین مربعات خطا و ضریب توافق (d) در شبیه‌سازی ماده خشک ارقام مختلف سویا تحت شرایط محدویت آب و بدون محدودیت را به‌ترتیب بین ۰/۳ تا ۰/۷ و ۰/۸۹ تا ۰/۹۹ نشان دادند. همچنین محمد و همکاران (Mohammed *et al.*, 2017) بیان کردند مدل CROPGRO-Chickpea از دقت بالایی در شبیه‌سازی ماده خشک نخود برخوردار بود.

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل CROPGRO-CHICKPEA برای ارقام عادل، آرمان و بیونیج با استفاده از اطلاعات آزمایش سال ۹۴-۱۳۹۳

Table 5- Validation results for CROPGRO-CHICKPEA model for Adel, Arman and Bivanij cultivars using data of experiments at 2015

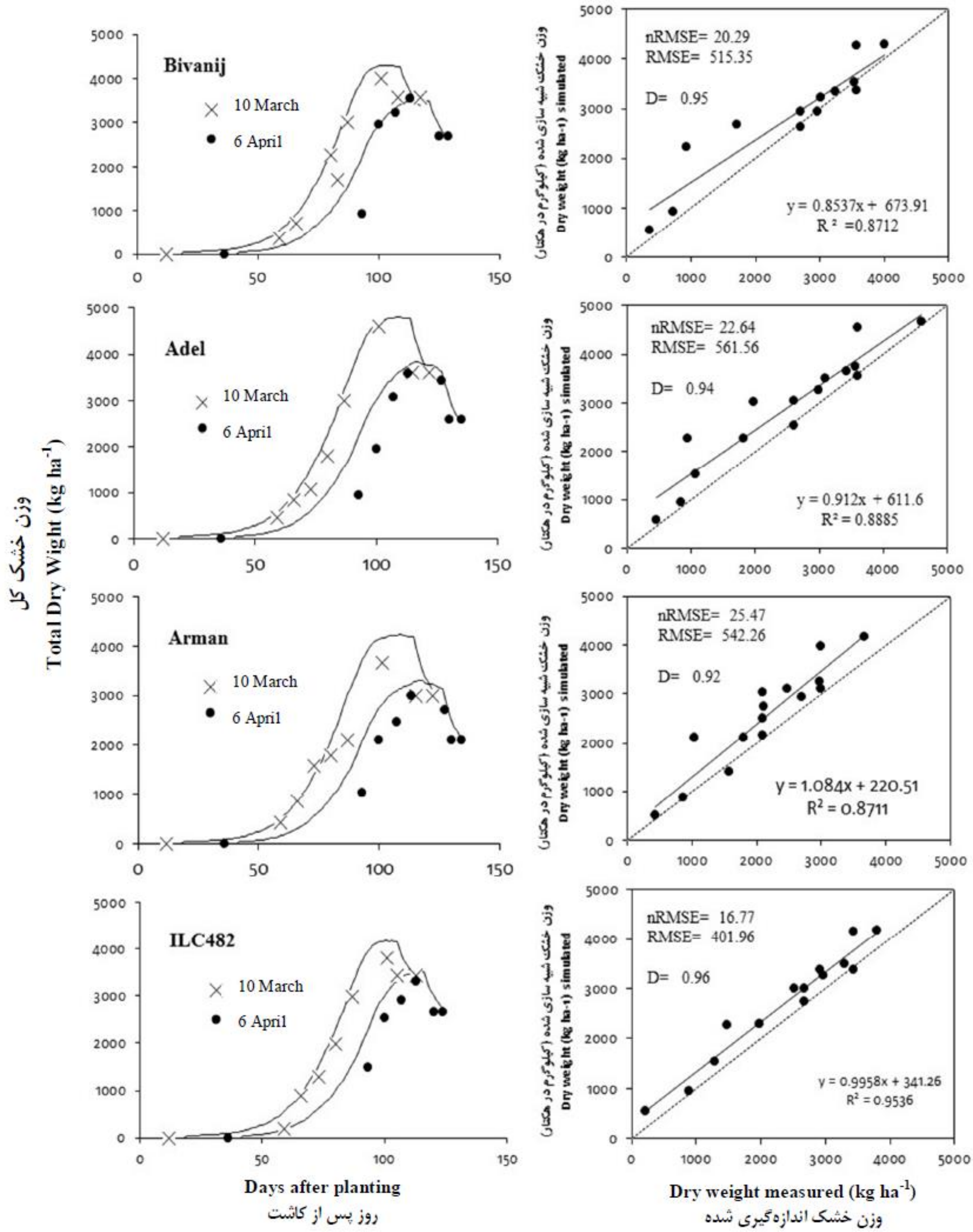
فصل رشد Growing season	Adel				Arman				Bivanij			
	میانگین وزن خشک کل Average of total dry weight (kg.ha^{-1})		میانگین عملکرد دانه Average of grain yield (kg.ha^{-1})		میانگین وزن خشک کل Average of total dry weight (kg.ha^{-1})		میانگین عملکرد دانه Average of grain yield (kg.ha^{-1})		میانگین وزن خشک کل Average of total dry weight (kg.ha^{-1})		میانگین عملکرد دانه Average of grain yield (kg.ha^{-1})	
	O [a]	S [b]	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S
2015	3914	3473	1556	1381	3412	3044	1167	1039	2383	2110	908	792
شاخص‌های آماری Statistical Indices												
RMSE [c]	674.2		223.4		399.8		195.3		292.2		134.5	
nRMSE (%) [d]	17.2		14.4		11.7		16.6		12.3		14.8	

[a] داده‌های مشاهده شده Observed data.

[b] داده‌های شبیه سازی شده Simulated data.

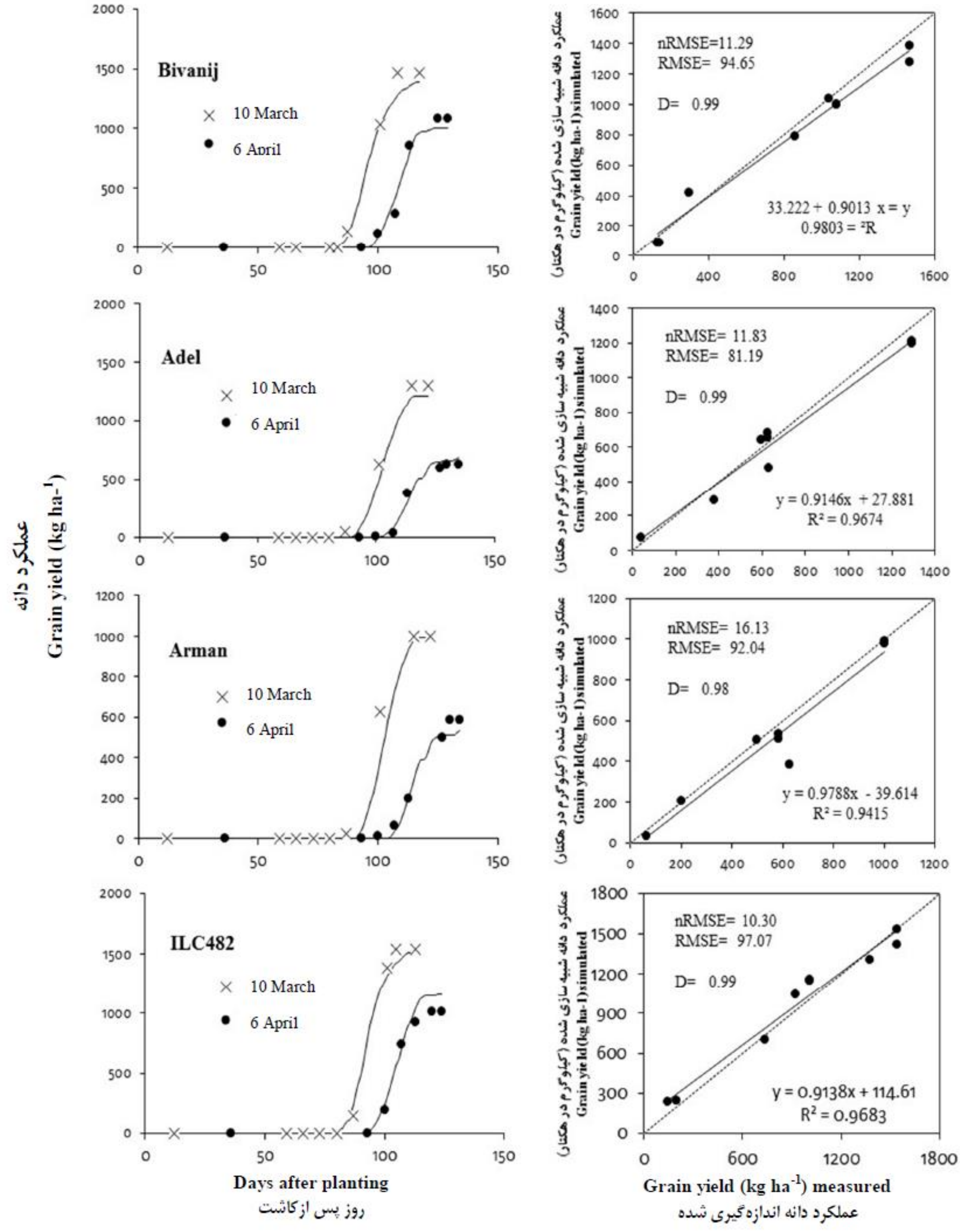
[c] جذر میانگین مربعات خطا Root mean square error.

[d] جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده Normalized root mean square error.



شکل ۳- گراف سمت چپ: اثر تاریخ کاشت بر وزن خشک کل اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) نخود. گراف سمت راست: آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده وزن خشک کل در تاریخ‌های کاشت برای ارزیابی مدل

Figure 3- Left figure: Effect of sowing date on measured (points) and simulated (lines) of chickpea total dry weight. Right figure: Regression analysis between simulated and measured total dry weight in sowing date treatments for model validation



شکل ٤- گراف سمت چپ: اثر تاریخ کاشت بر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) نخود. گراف سمت راست: آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه گیری شده عملکرد دانه در تاریخ‌های کاشت برای ارزیابی مدل

Figure 4- Left figure: Effect of sowing date on measured (points) and simulated (lines) of chickpea grain yield. Right figure: Regression analysis between simulated and measured grain yield in sowing date treatments for model validation

عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که از شروع مرحله گلدهی نخود (حدود ۶۸ تا ۸۰ روز پس از کاشت در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند و ۵۵ تا ۶۸ روز پس از کاشت در کاشت ۱۷ فروردین)، در تمام تیمارها عملکرد دانه به سرعت افزایش یافت و تا انتهای مرحله رسیدگی فیزیولوژیک به حداکثر مقدار خود رسید (شکل ۴). این نتایج با داده‌های مشاهده شده در شرایط مزرعه هم‌خوانی بسیار بالایی داشت. هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی تأخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد دانه شد، به گونه‌ای که با تأخیر در کاشت از ۲۰ اسفند به ۱۷ فروردین میزان عملکرد دانه هم در شرایط مزرعه و هم شبیه‌سازی به‌ترتیب حدود ۳۷/۷ و ۳۳/۹ درصد کاهش یافت. صرف نظر از تاریخ کاشت بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ به‌ترتیب به میزان ۱۲۷۵/۵ و ۱۳۴۵/۵ کیلوگرم در هکتار مربوط به رقم ILC482 بود. به نظر می‌رسد وجود عوامل محیطی مناسب در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند، نظیر تشعشع خورشیدی و درجهٔ حرارت مطلوب در زمان گلدهی و پرشدن دانه موجب افزایش بازده فتوسنتزی و در نتیجه افزایش عملکرد دانه نخود شد. همچنین در تاریخ کاشت ۱۷ فرودین عواملی مانند شاخص سطح برگ پایین، جذب کمتر تشعشع در طی مرحلهٔ رشد رویشی، کوتاه شدن دورهٔ رشد زایشی و برخورد مرحلهٔ گل‌دهی و مراحل پس از آن با دمای بالا سبب اختلال در انتقال مواد ذخیره‌ای به دانه‌ها شده و در نهایت کاهش عملکرد را به‌دنبال داشته است (Fathi *et al.*, 2003; Behtari *et al.*, 2010).

نتایج این بررسی همچنین نشان داد که بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و داده‌های مشاهده شده عملکرد دانه اختلاف بسیار ناچیزی وجود داشت، به‌طوری‌که میزان جذر میانگین مربعات خطا و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده عملکرد دانه برای ارقام کشت شده به‌ترتیب بین ۸۱/۲ تا ۲۲۳/۴ کیلوگرم در هکتار و ۱۰/۳ تا ۱۶/۶ درصد میانگین مشاهده‌ها بود (شکل ۴ و جدول ۵). ضریب توافق ویلموت (d) برای عملکرد ارقام کشت شده حدود ۰/۹۹ بود که نشان‌دهنده توانایی بسیار بالای مدل CROPGRO-Chickpea در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف بود (شکل ۴). علاوه براین، نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌ساز شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل CROPGRO-Chickpea قادر بود تا بیش از ۹۸ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش‌بینی کند که نشان از توانایی بسیار خوب این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تاریخ کاشت‌های مختلف داشت (شکل ۴). محققین دیگر نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی عملکرد دانه نخود توسط مدل CROPGRO-Chickpea را از ۱۴۷/۹ تا ۲۴۹ کیلوگرم در هکتار نشان دادند (Mohammed *et al.*, 2017; Patil *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2014).

نتیجه‌گیری

نتایج این بررسی نشان داد که بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی بسته نرم‌افزاری DSSAT نسخه ۴/۶ به‌خوبی توانست ضرایب ژنتیکی مورد نظر را برای ارقام مورد مطالعه در شرایط اقلیمی کرمانشاه محاسبه کند، به‌گونه‌ای که نتایج واسنجی این ضرایب برای صفات شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده در تیمار تاریخ کاشت مطلوب نشان داد، مدل قادر است با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو نخود را پیش‌بینی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ارقام مورد بررسی بود. هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی تأخیر در کاشت منجر به کاهش عملکرد نخود شد. به‌طوری‌که بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده به‌ترتیب، ۱۳۲۶/۷۵ و ۱۲۷۹/۷۵ کیلوگرم در هکتار در تاریخ کاشت ۲۰ اسفند حاصل شد. درحالی‌که مدل توانست با دقت بسیار بالایی صفات مورد بررسی را پیش‌بینی کند، پایین‌ترین دقت ارزیابی در بین این صفات مربوط به شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ بود. با توجه به نتایج، مدل روند شاخص سطح برگ را بیشتر از مقدار به‌دست آمده شبیه‌سازی کرده است، علت این امر می‌تواند وجود محدودیتی در مزرعه بوده که به مدل معرفی نشده است. به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که مدل CROPGRO-Chickpea می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مفید برای پیش‌بینی ویژگی‌های رشد و نمو نخود به‌کار برده شود.

References

1. Amouzou, K. A., Naab, J. B., Lamers, J. P., Borgemeister, C., Becker, M., and Vlek, P. L. 2018. CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water-and N-use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. Agricultural Systems 165: 85-96.
2. Benjamin, J., and Nielsen, D. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. Field Crops Research 97: 248-253.
3. Boote, K. J., Prasad, V., Allen Jr, L. H., Singh, P., and Jones, J. W. 2018. Modeling sensitivity of grain yield to elevated temperature in the DSSAT crop models for peanut, soybean, dry bean, chickpea, sorghum, and millet. European Journal of Agronomy 100: 99-109.

4. Deihimfard, R., Nassiri Mahallati, M., and Koocheki, A. 2015. Simulating the potential yield and yield gaps of sugar beet due to water and nitrogen limitations in Khorasan province using SUCROS model. Agroecology 7: 315-330. (in Persian with English abstract).
5. Goudriaan, J., and Van Laar, H. 2012. Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises. Springer Science & Business Media.
6. Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., Singh, U., Lizaso, J. L., White, J. W., Uryasev, O., Ogoshi, R., Koo, J., Shelia, V., and Tsuji, G. Y., 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (www.DSSAT.net). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
7. Jalilian, A., Mondani, F., Khorramivafa, M., and Bagheri, A., 2017. Evaluation of CliPest model in simulation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) competition in Kermanshah. Agroecology 10: 248-266. (in Persian with English abstract).
8. Jame, Y. W., and Cutforth, H. W. 1996. Crop growth models for decision support systems. Canadian Journal of Plant Science 76: 9-19.
9. Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., and Ritchie, J. T. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18: 235-265.
10. Jones, J. W., Tsuji, G. Y., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Thornton, P. K., Wilkens, P. W., Imamura, D. T., Bowen, W. T., and Singh, U. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. In Understanding options for agricultural production (pp. 157-177). Springer, Dordrecht.
11. Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Huth, N. I., Hargreaves, J. N., Meinke, H., Hochman, Z., and McLean, G. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy 18: 267-288.
12. Liu, H., Yang, J., Drury, C. A., Reynolds, W., Tan, C., Bai, Y., He, P., Jin, J., and Hoogenboom, G. 2011. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. Nutrient Cycling in Agroecosystems 89: 313-328.
13. Liu, H. L., Liu, H. B., Lei, Q. L., Zhai, L. M., Wang, H. Y., Zhang, J. Z., Zhu, Y. P., Liu, S. P., Li, S. J., Zhang, J. S., and Liu, X. X. 2017. Using the DSSAT model to simulate wheat yield and soil organic carbon under a wheat-maize cropping system in the North China Plain. Journal of Integrative Agriculture 16: 2300-2307.
14. Liu, S., Yang, J., Zhang, X., Drury, C., Reynolds, W., and Hoogenboom, G. 2013. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. Agricultural Water Management 123: 32-44.
15. Mahru, A. H., Soltani, A., Galeshi, S., and Kalate-Arabi, M. 2010. Estimates of genetic coefficients and evaluation of model DSSAT for Golestan province. Elecronic Journal of Crop Production 3: 229-253. (in Persian with English abstract).
16. Mohammed, A., Tana, T., Singh, P., Korecha, D., and Molla, A. 2017. Management options for rainfed chickpea (*Cicer arietinum* L.) in northeast Ethiopia under climate change condition. Climate Risk Management 16: 222-233.
17. Mondani, F., and Jalilian, A. 2019. Evaluation of the Interaction between Sowing Date and Cultivar on Different Traits of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) in Kermanshah Climate Conditions. Plant Production Technology 1: 37-51. (in Persian with English abstract).
18. Mondani, F., Nassiri-Mahallati, M., Koocheki, A., and Hajian-Shahri, M. 2015. Simulation of wild oat (*Avenaludoviciana* L.) Competition on Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Growth and Yield. I: Model Description and Validation. Iranian Journal of Field Crops Research 13: 218-231. (in Persian with English abstract).
19. Mondani, F. 2017. Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea maize*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition. Journal of Water and Soil 31: 1665-1678. (in Persian with English abstract).
20. Ovando, G., Sayago, S., and Bocco, M. 2018. Evaluating accuracy of DSSAT model for soybean yield estimation using satellite weather data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 138: 208-217.
21. Patil, D. D., and Patel, H. R. 2017. Calibration and Validation of CROPGRO (DSSAT 4.6) Model for Chickpea under Middle Gujarat Agroclimatic Region. International Journal of Agriculture Sciences 9: 4342-4344.
22. Penning, de Vries, F. W. T., and Van Laar, H. H. 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs. Wageningen (Netherlands): Pudoc. 308p.
23. Singh, P., and Virmani, S. 1996. Modeling growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Field Crops Research 46: 41-59.
24. Singh, P., Nedumaran, S., Boote, K. J., Gaur, P. M., Srinivas, K., and Bantilan, M. C. S. 2014. Climate change impacts and potential benefits of drought and heat tolerance in chickpea in South Asia and East Africa. European Journal of Agronomy 52: 123-137.
25. Soltani, A., Robertson, M. J., Mohammad-Nejad, Y., and Rahemi-Karizaki, A. 2006. Modeling chickpea growth and development: leaf production and senescence. Field Crop Research 99: 14-23.

26. Sorecha, E. M., Kibret, K., Hadgu, G., and Lupi, A. 2017. Exploring the ımpacts of climate change on Chickpea (*Cicer arietinum* L.). Production in central highlands of Ethiopia. Academic Research Journal of Agricultural Science and Research 5: 140-150.
27. Taie, J., Amiri, E., Aien, A., Boroumand, N., and Jokar, M. 2018. Evaluation of DSSAT model for potential yield prediction of potato under autumn cropping system (Case study: Jiroft, Iran), Journal of Crops Improvement 19: 893-905.
28. Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society 63: 1309-1313.
29. Yang, J., Yang, J., Dou, S., Yang, X., and Hoogenboom, G. 2013. Simulating the effect of long-term fertilization on maize yield and soil C/N dynamics in northeastern China using DSSAT and CENTURY-based soil model. Nutrient Cycling in Agroecosystems 95: 287-303.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 197-212

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۲۱۲-۱۹۷

Simulation Effects of Sowing Date on Growth and Yield of Rainfed Chickpea (*Cicer arientinum* L.) by CROPGRO-CHICKPEA Model

H. Hajishabani[1], F. Mondani[2*], A. Bagheri[3]

Received: 27-08-2019
Accepted: 28-12-2019

Introduction

Simulation crop models allow to represent growth, phenological development and yield of crops and to evaluate new technologies or conditions not yet explored. The DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) is one of the most widely used modeling systems across the world. The DSSAT was developed with a modular structure to facilitate its maintenance and to include additional components to simulate cropping systems, considering different soils, climates, and management conditions. The DSSAT has also proven to be a useful tool for selecting improved agricultural practices. Currently, the DSSAT is able to incorporate models of 27 different crops, including several cereal grains, grain legumes, and root crops. The CROPGRO-Chickpea model is part of the DSSAT model. This model allows simulating the development and yield of the grain legumes, to represent and to evaluate the influence of multiple environmental and agronomic factors. Among all management practices, selecting optimum sowing date helps in minimizing the effect of high temperatures during the grain filling period responsible for reduction of grain yield. Therefore, the objectives of the present study were: (1) to estimate the genetic coefficients and calibrate the CROPGRO-Chickpea model (2) to evaluate the performances of the CROPGRO-Chickpea model in simulating chickpea cultivars growth, development and grain yield in different sowing dates under Kermanshah climatic conditions.

Materials and Methods

This experiment was carried out in a split-plot design with three sowing dates (28 February, 10 March and 6 April) as main plots and 4 current chickpea cultivars (Bivanij, Adel, Arman and ILC482) as sub plots with three replications at 2017. The required model inputs consisted field management, daily weather conditions, soil profile characteristics, and cultivar characteristics. The cultivar coefficients were obtained under optimum conditions (i.e., minimum stress in weather and nutrients). The genetic coefficients of the chickpea cultivars i.e. Bivanij, Adel, Arman and ILC482 were determined using the GenCal software of DSSAT v 4.6 for sowing date of 28 February treatment. Model performance was evaluated by comparing simulated and measured values of chickpea cultivars phonological development stages (DVS), leaf area index (LAI), total dry weight (TDW) and grain yield (GY) for another sowing date treatments (10 March and 6 April) by root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE) and index of agreement (d).

Results and Discussion

The results of model calibration showed that there were very good agreements between the DVS, LAI, TDW and GY of observed and simulated values. The results of the model validation also indicated that the CROPGRO-Chickpea model was able to accurately simulate DVS and yield for chickpea cultivars. The nRMSE values for Bivanij, Adel, Arman and ILC482 of LAI were 26.1, 27.9, 28.3 and 20.1%, respectively. The index of agreement (d) for LAI ranged from 0.8 to 0.9. The nRMSE average for evaluated cultivars of TDW was 16.5%. The index of agreement (d) for TDW was 0.99. The nRMSE average for evaluated cultivars of GY was 13.5%. The index of agreement (d) for GY ranged from 0.96 to 0.98. For both simulated and measured conditions the late sowing date led to reduce in the grain yield. The greatest grain yield of simulated and measured were 1279.7 and 1326.6 kg ha^{-1} that related to sowing date of 10 March 2017 treatment.

Conclusions

Based on the results of model calibration, it can be concluded that the estimated of genetic coefficients by the GenCalc software were very robust in simulating the phenological development stages and growth of chickpea. The results of model validation showed that the CROPGRO-Chickpea model was able to give an accurate simulation of all studied traits of chickpea cultivars except leaf area index in different sowing date under Kermanshah climate conditions.

Keywords: Chickpea cultivars, Grain yield, Model calibration, Phonological development

1- MSc. Student in Agroecology, Department of Crop Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
2- Assistant Professor in Crop Ecology, Department of Crop Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
3- Assistant Professor in Weed Science, Department of Crop Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran
(*- Corresponding Author Email: f.mondani@razi.ac.ir)